张力架线电动张力机能量回收系统及其控制策略

周 磊[1*] 王建永[1] 房 喆[1] 高 尚[2] 陈 盼[3] 曾 利[1]
1.湖南中联重科应急装备有限公司,长沙,410200
2.湖南大学电气与信息工程学院,长沙,410082
3.比亚迪汽车工程研究院,深圳,518100

摘要:在分析张力机高占比、长周期张力工况的基础上,提出了一种基于电阻耗能的能量回收系统。该系统通过整合张力系统、动力电池与耗能系统形成能量闭环,实时监测整机参数,并依据自适应控制算法调节耗能电流,实现系统能量的动态平衡。试验研究表明,该系统可调控回收电流,持续耗散富余能量,有效规避电池过流、过充及电气元件过压等风险,确保系统安全稳定运行。该能量回收系统适配高占比、长周期能量回收工程场景,为工程装备的绿色转型提供了关键技术支撑。

关键词:电动张力机;能量回收;电阻耗能;能量平衡;富余能量
中图分类号:TH171;TP272;TM619
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.015 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Energy Recovery System and Its Control Strategy for Electric Tensioner in Tension Stringing

ZHOU Lei[1*] WANG Jianyong[1] FANG Zhe[1] GAO Shang[2] CHEN Pan[3] ZENG Li[1]
1.Hunan Zoomlion Emergency Equipment Co., Ltd., Changsha,410200
2.College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha,410082
3.Automotive Engineering Research Institute of BYD, Shenzhen,518100

Abstract: A resistive energy dump-based energy recovery system was proposed based on an analysis of high-proportion and long-cycle stringing conditions of tensioners. An energy closed loop was established by integrating the tension system, power battery and energy dump unit. Operating parameters were monitored in real time, and the dump current was adjusted through an adaptive control algorithm to realize dynamic energy balance. Tests indicated that the recovery current could be controlled and surplus energy dumped continuously, so that battery overcurrent, overcharge, and electrical component overvoltage were effectively avoided, and safe and stable operation was guaranteed. The system is suitable for high-proportion and long-cycle energy recovery scenarios and provides key technical support for the green transformation of engineering equipment.

Key words: electric tensioner; energy recovery; resistive energy dump; energy balance; surplus energy

0 引言

随着特高压输电工程的大规模建设,张力架线施工对装备的环保性与作业能效提出了更高要求。传统张力机采用柴油机-液压驱动方案,普遍存在能效偏低、污染排放大、运行噪声高等缺陷,不仅危害操作人员健康,还易干扰施工指令的准确传递[1]。更为突出的是,在核心作业的张力工况下,牵引机拖动导线带动张力轮转动所产生的机械能,在传统液压系统中仅通过液压油溢流以热能形式全部耗散,全程无能量回收,造成显著的能源浪费,与国家“双碳”战略对工程装备绿色化、节能化的发展要求不符。

电动张力机凭借低噪声、零排放、张力工况可实现能量回收等优势,成为行业升级的必然趋势[1],但其张力工况下的能量回收技术仍未形成成熟的工程化方案,存在显著行业瓶颈。当前针对电动张力机能量回收的研究主要有4种技术路线,但均无法完全满足张力架线施工对连续性和安全性的实际需求,具体分述如下。

1)电机与磁粉制动器组合方案[2]。被动工况下电机发电回收能量,磁粉制动器提供张力。然而,电池饱和时电机须停止发电,张力全由磁粉制动器滑差发热提供,且引入磁粉制动器会增加传动链复杂度,磁粉长期磨损易打滑,导致系统可靠性下降,难以满足大张力长周期作业需求。

2)液压-发电混合方案[3]。该方案保留液压

收稿日期:2025-10-30

系统，取消柴油机并增设发电机与电池，仅在高速放线工况下由发电机回收能量，低速、大张力时仍依赖液压溢流耗能。其局限在于无法实现全工况能量回收，且系统结构复杂，能效提高有限。

3）纯电动＋电池回收方案[4]。该方案采用电机直驱张力轮，张力工况下发电并将能量回馈至电池。然而，该方案完全依赖电池吸收回收能量，缺乏独立可控的调节机制，当电池满电、低温或老化导致充电能力下降时，持续产生的电能无法及时消纳，易引发母线过压、电池过充等故障。

4）集中能量单元方案[5]。采用大容量电池构建张力场能量共享单元，可将回收电能供给场内其他电动设备使用，实现了区域电能的协同调配。但该方案未配备机载动态耗能环节，无法解决单台张力机在电池饱和或充电受限时的能量平衡问题，且额外增加了设备和场地占用。

综上，现有能量回收方案难以兼顾能量回收能效与系统能量平衡，无法保障施工连续与系统安全，其关键在于缺乏可根据电池实时状态与系统能量流进行动态调控的能量平衡机制。为此，本文提出一种基于电阻耗能的能量回收系统，该系统可实现富余能量的持续稳定耗散，有效解决电池饱和时的能量平衡难题，同时，其能流路径简洁、无复杂转换环节，回收效率更高。

1　工况分析

依据DL/T 1109—2019中主动式张力机的功能定义及DL/T 5343—2018的施工工艺要求，电动张力机在张力架线施工中包含三种工况。①张力工况：张力轮被导线拖动并为导线提供张力，此时张力电机发电，能量回馈至直流母线。②牵引工况：张力轮主动旋转进行牵引，将牵引绳回牵至张力场，此时张力电机耗电，无能量回收。③送线工况：张力轮主动旋转进行送线，释放一定长度导线消除紧绷状态，便于导线对接、调整等操作，此时张力电机耗电，无能量回收。其中仅张力工况具备能量回收条件，下文分析其特性。

张力工况受协同作业的牵引机绳盘容量限制，张力放线每500～800 m需待机约600 s以等候更换绳盘（DL/T 372—2019）。按额定放线速度2.5 km/h（DL/T 1109—2019）计算，完成500 m放线约720 s。

图1所示为张力工况（据DL/T 1109—2019、DL/T 5343—2018和DL/T 372—2019绘制）与轻型汽车的CLTC-P工况（GB/T 38146.1—2019）对比。CLTC-P工况周期为1800 s，其中可进行能量回收的减速段占26.4%，单次回收时间3.5～5 s，减速与加速的转换周期为10～20 s。在同等时长内张力工况可进行能量回收占比达66%，单次回收（张力放线）时间约720 s，回收转换周期达1320 s（600 s待机＋720 s张力放线）。两者在回收占比、持续时间、转换周期上存在本质差异。

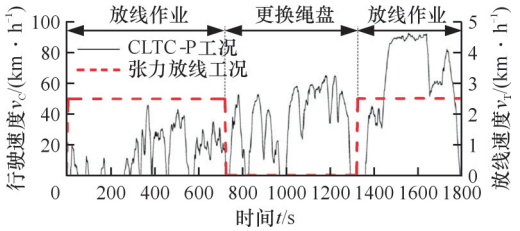


图1　CLTC-P与张力放线工况对比

Fig.1　Comparison of CLTC-P and tension stringing operating cycles

当前，以汽车为代表的动能回收场景具有回收占比低、持续时间短、转换周期短的特征，其能量回收系统普遍采用“超级电容＋双向DC/DC转换器”组合方案，通过削峰填谷来调节回收电流。当回收能量超出系统吸收能力时，则通过机械制动耗能或由电阻以固定功率进行“斩波”耗能，以维持直流母线电压稳定[6-8]。

此类方案中，能量回收与释放都需经DC/DC转换，存在转换损耗，能流路径长且复杂，加之超级电容仅适用于短时高频回收工况，自身存在自放电率高、能量密度低及成本高等短板，难以满足张力工况长时间、高占比、大容量的能量回收需求。对于无机械制动的电动张力机，若电池回收能力不足而放线作业持续，富余能量无法消纳，将导致母线过压、电池过流/过充甚至热失控。

由此可见，传统汽车的能量回收方案无法直接移植应用于电动张力机，因此，必须针对张力工况的特殊性，设计一套可平衡系统能量、稳定母线电压、保护电池安全的能量回收系统。

2　系统构成与原理

针对张力工况长时连续、高占比的特点，本文提出一种基于电阻耗能的能量回收系统。其核心是构建“张力发电-电池回收-耗能调节”的能量闭环，通过实时动态耗散富余能量，精确控制回收电流，稳定母线电压，保障系统安全。

2.1　系统构成

电动张力机能量回收系统如图2所示，主要由五大功能单元构成。

2.1.1　张力系统

张力系统是核心作业与能量产生单元，主要

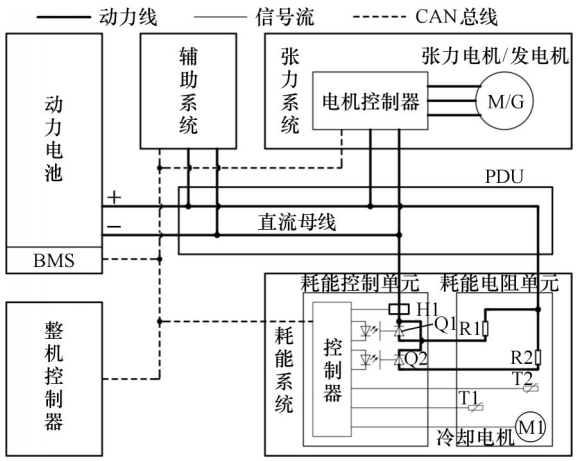


图2 电动张力机能量回收系统构成

Fig.2 Architecture of the electric tensioner energy recovery system

包括张力轮、减速机、张力电机及其控制器。如图3所示[9]，张力轮通过减速轮系连接至张力电机。电机具备电动/发电功能，可适配前文所述的张力、牵引、送线三种工况。

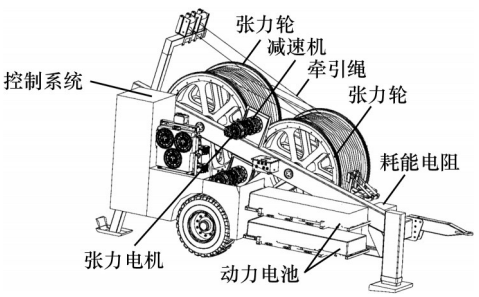


图3 电动张力机关键件安装示意

Fig.3 Installation layout of the critical components for the electric tensioner

2.1.2 动力电池系统

动力电池系统是整机的能量存储中心，由电池包与电池管理系统(BMS)组成，其主要功能为：维持母线电压稳定，储存张力工况下回收的电能，并在牵引/送线工况下为整机供电。

2.1.3 耗能系统

耗能系统是能量调控的执行单元，由耗能控制单元与耗能电阻单元两部分构成。

1)耗能控制单元：接收整机控制器指令，通过驱动Q1、Q2两组IGBT功率管调控耗能电流。回路中的霍尔分流器H1实时检测电流，并采集电阻单元温度，控制风扇电机M1，实现温控保护。

2)耗能电阻单元：与控制单元IGBT功率管对应，包含R1、R2两组电阻阵列，将电能转化为热能耗散。配备强制风冷系统，在风道入口(T1)与出口(T2)设温度传感器，实时监控散热状态。

2.1.4 辅助系统

辅助系统包括维持整机运行所必需的子系统，如热管理系统、润滑系统、辅助液压系统(控制支腿、压线等机构)等。这些单元并联于直流母线，消耗电能。

2.1.5 整机控制器

整机控制器是系统控制核心，负责实时采集数据，运行控制算法，协调张力系统、耗能系统及辅助系统工作，实现全局能量平衡与安全保护。

2.2 系统原理

系统能量流向如图4所示。各系统经电源分配单元(power distribution unit，PDU)汇集于直流母线，双向箭头表示电流方向可逆。其中，I_{gen}为张力电机与PDU间电流(张力工况流向PDU发电，牵引/送线工况反向耗电)；I_{rec}为电池与PDU间电流(流向电池为回收，反向为放电)；I_{aux}、I_{dump}分别为辅助系统、耗能系统从PDU消耗的电流，方向恒为从PDU流出；I_{aux}与I_{dump}之和构成调节电流I_{reg}。能量平衡关系为$I_{gen}=I_{rec}+I_{reg}$。

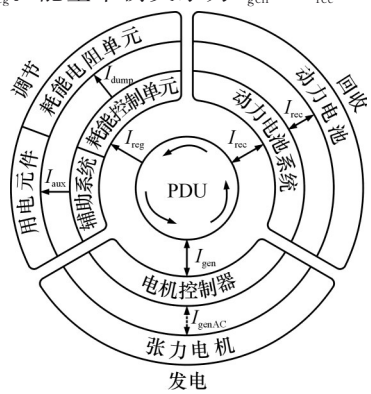


图4 电动张力机系统能量流向

Fig.4 Energy flow of the electric tensioner system

2.2.1 能量产生(发电)

张力系统在张力工况下，牵引机通过导线驱动张力轮旋转，迫使与之连接的张力电机转子切割定子磁场产生交流电流I_{genAC}，再经电机控制器整流为直流电流I_{gen}后馈送入母线。

2.2.2 能量流向与回收

张力系统、电池系统、耗能系统及辅助系统并联于母线，经PDU汇集。若发电电流I_{gen}小于用电电流I_{aux}，其能量缺口由电池放电补充；反之若发电电流I_{gen}大于用电电流I_{aux}时，则会引起母线电压攀升，过剩电能由电池回收。

2.2.3 富余能量产生

富余能量指张力发电超出辅助系统用电和电池回收能力之和的部分。主要源于以下三种情形。

1)能量饱和与系统限制：电池处于满电饱和

状态或SOC达到系统预设上限，无法继续回收能量，但张力放线作业继续进行、持续发电。

2）回收能力限制：电池充电电流随电压升高和温度降低而下降，实际回收能力受限，无法吸收全部发电电流，如图5所示（数据来源于弗迪电池有限公司B26电池包电芯技术规格书）。

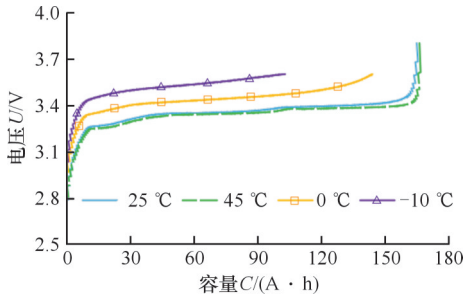


图5　磷酸铁锂电芯充电特性曲线

Fig.5　LFP cell charge characteristic curve

3）张力发电激增：张力放线作业时，因导线垂度变化，连接器与牵引板过滑车时导致作用于张力电机的实际扭矩和转速剧烈波动，引起发电电流I_{gen}激增，超出电池回收能力。

2.2.4　富余能量耗散

富余能量将导致母线电压持续攀升，易引发元件过压，电池回收过流、过充甚至热失控，须及时耗散。系统采取以下两种耗能措施分级应对。

1）纯电阻耗能：如图2所示，耗能电阻R1、R2经PDU接至母线正极，另一端分别接至IGBT功率管Q1、Q2集电极。两管发射极并联后穿过霍尔分流器H1的检测孔返回母线负极形成可控回路，电能于此转化为热量并耗散。张力放线时，整机控制器实时计算耗能电流I_{dump}并发送至耗能系统。耗能控制单元通过光耦驱动Q1、Q2，采用脉宽调制（PWM）调节占空比，精确控制流过R1、R2的电流。霍尔分流器H1检测实际电流并反馈，形成PID闭环控制，确保快速、精准跟踪指令，实现富余能量的实时动态耗散。

2）负载协同耗能：当纯电阻耗能达满负荷仍无法平衡能量时，整机控制器启动协同耗能机制，主动提高热管理、辅助液压等作业必需辅助子系统的功耗（如在安全范围内加大制冷功率、提高溢流压力等），将多余能量分配至各子系统，以增大用电I_{aux}来协同消耗富余能量。若协同耗能仍无法平衡，则执行安全降载策略，降低张力电机张力，从源头减少富余能量产生。

2.2.5　耗能电阻冷却与保护

耗能电阻在耗散能量时会产生大量热，为控制温升超限引发的热失控、热干扰风险，系统从热场隔离、强制散热、温度保护三个维度进行专项设计。

1）热场隔离与散热布局。如图6所示，系统采用集“结构阻隔、材料隔热、独立仓体”于一体的三重热隔离方案，彻底阻断电阻散热对相邻电气模块的热干扰。①物理结构阻隔：将电阻与电池、电气件分置于机架大梁的两侧，利用大梁的金属结构作为一道热屏障，阻断热辐射向电气元件侧的传导路径。②材料隔热强化：在电阻仓体内侧紧贴大梁位置铺设隔热棉，进一步阻隔热辐射，避免热传导至对侧影响电气件。③独立仓体与强制风冷：耗能电阻采用独立仓体布局，通过风扇电机M1实现对电阻阵列的强制对流散热，风道遵循下部进风、机体外侧出风的定向风道设计；进风口设于机体中下部（近地面），可避开太阳直射区域，利用稍低的环境温度提高换热效率，改善高温环境下的换热效果。

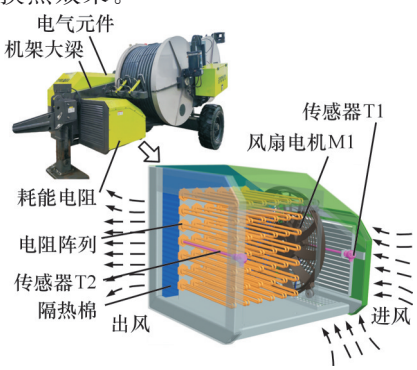


图6　耗能电阻单元冷却示意

Fig.6　Cooling schematic of energy-consuming resistor Unit

2）温度保护。系统构建“故障识别-功率削减”保护体系，全面应对冷却故障、环境温度升高等异常工况。①故障识别：实时监测风道入口温度T_1、出口温度T_2、环境温度T_{amb}，当检测到T_1高于T_{amb}时判定风扇电机M1故障或风道堵塞（导致热蔓延至入口侧），系统立即触发预警。②自动限流与功率削减：若检测到T_2高于最高预设温度或散热故障，系统将触发负载协同耗能机制（2.2.4节），通过减小富余能量来降低耗能电流，从源头削减电阻发热量，有效缓解散热压力。

3　控制策略

系统控制策略分为耗能控制与耗能执行两部分，通过实时监测电池状态、耗能系统状态及系统能量流，动态调控耗能电流，以实现系统能量平衡并控制电池回收电流。

3.1　耗能控制

3.1.1　控制模式

张力架线施工周期具有间歇性和阶段性，单

区段工期为3～20天，其后设备常入库闲置0.5～3个月。文献[10]研究表明，电池SOC保持水平与日历老化、容量衰减呈正相关，但在40%～70%区间内，SOC升高对容量衰减的影响较小。为减缓库存期间电池老化，系统需将SOC维持在该区间，因此设置了两种控制模式。

1)库存模式。此模式下，系统读取电池实际SOC值(S_{act})及预设的库存SOC上下限(S_{stor}^{max}、S_{stor}^{min})。控制逻辑如图7所示，若$S_{act}<S_{stor}^{min}$，系统提示充电；若$S_{stor}^{min}\leqslant S_{act}\leqslant S_{stor}^{max}$，允许入库；若$S_{act}>S_{stor}^{max}$，系统启动“涓流耗能”，以不超过电池额定放电电流30%的电流放电，将SOC降至预设区间。

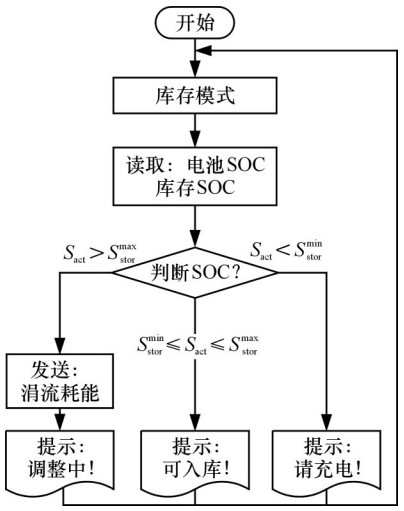


图7 库存模式耗能控制流程

Fig.7 Storage mode energy consumption control flow

2)张力模式。张力工况时，系统进入张力模式，如图8所示。读取电池实际SOC值和预设回收目标SOC值(S_{tar})。若$S_{act}>S_{tar}$，系统启动“峰值耗能”，快速消耗能量；若$S_{act}\leqslant S_{tar}$，则根据实时电池参数与系统参数计算耗能电流I_{dump}并控制耗能系统执行耗能，以维持发电电流I_{gen}、回收电流I_{rec}和调节电流I_{reg}之间的平衡(图4)。此后，系统循环读取参数并更新耗能电流I_{dump}，以应对发电波动，维持动态平衡，直至作业结束。若收到“耗能超限”警告，系统将启动高能耗模式，通过负载协同耗能机制(2.2.4节)提高热管理、辅助液压子系统功耗；若仍无法平衡，则执行安全降载策略，强制降低张力电机张力以减小发电电流I_{gen}，并提示“张力受限”，引导操作员调整施工参数，优先保证系统安全稳定运行。

3.1.2 耗能电流计算

如前所述，系统需动态计算耗能电流，相关物理量定义如下：I_{lim}为限制回收电流(正值)，根据

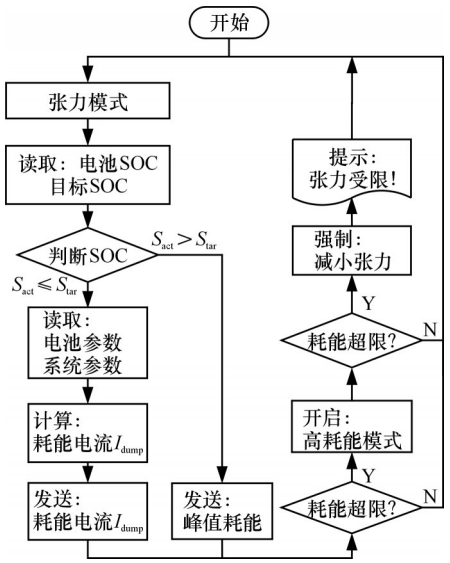


图8 张力模式耗能控制流程

Fig.8 Tension mode energy consumption control flow

机型参数预设；I_{ava}为可用回收电流(非负)，BMS根据电池温度、电压、SOC计算得出，亏电较大，满电为0；实际回收电流I_{rec}由BMS实时采集；耗能电流I_{dump}非负。

本控制策略仅适用于张力系统处于发电状态($I_{gen}>0$)。回收电流I_{rec}应受限于I_{lim}与I_{ava}中的较小值，定义安全回收上限

$$I_{saf}=\min(I_{lim},I_{ava}) \tag{1}$$

富余电流I_{sur}定义为实际回收电流与安全上限的差值：

$$I_{sur}(k)=I_{rec}(k)-I_{saf}(k) \tag{2}$$

若$I_{sur}(k)>0$，实际回收电流超出安全上限，存在富余电流，需增加耗能电流，增加量为I_{sur}；若$I_{sur}(k)<0$，实际回收电流低于安全上限，有回收余量，可减少耗能电流，减少量为$|I_{sur}|$。

为避免电流突变导致系统振荡，采用积分型平滑调节，耗能电流I_{dump}按以下迭代公式更新：

$$I_{dump}(k)=\max(0,I_{dump}(k-1)+I_{sur}(k)) \tag{3}$$

其中，k为控制周期序号，$\max(0,\cdot)$保证耗能电流非负。实际应用中可对I_{dump}设置电流死区与耗能上限，以抑制频繁动作并防止积分饱和，本文为阐述原理未显式加入。初始时刻$k=0$时，设$I_{dump}(0)=0$。

举例说明如下：设$I_{lim}=100$ A，当前$I_{ava}=120$ A，则$I_{saf}=100$ A，初始$I_{dump}(0)=0$。若$I_{rec}=120$ A，则$I_{sur}=20$ A，需增加耗能电流20 A；若$I_{rec}=80$ A，则$I_{sur}=-20$ A，可减少耗能电流20 A($I_{dump}(k-1)\geqslant 20$)。若电池满电($I_{ava}=0$)，则$I_{saf}=0$，任何$I_{rec}>0$均产生正$I_{sur}$，由耗能系统全额耗散。

3.2　耗能执行

耗能执行由耗能控制单元驱动耗能电阻完成，核心是电流的精准调控与电阻冷却管理，控制流程见图9。

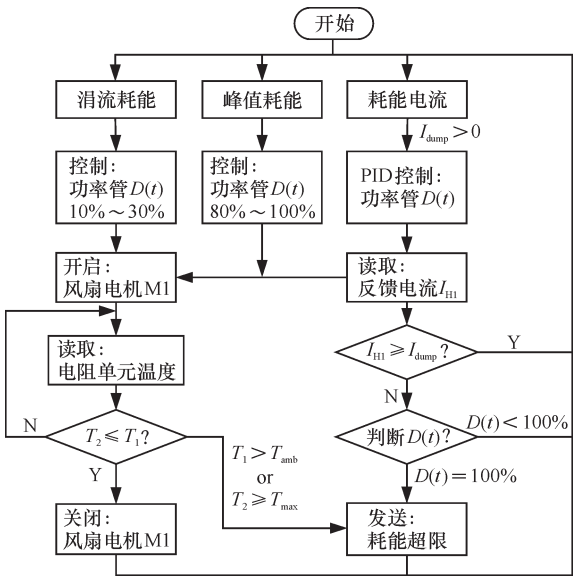


图9　耗能执行控制流程

Fig.9　Energy consumption execution control flow

3.2.1　耗能电流调控

耗能控制单元接收三种指令进行调控：若收到“涓流耗能”则控制功率管以10%～30%的占空比导通，缓慢耗能；若收到“峰值耗能”则以80%～100%的占空比导通，迅速耗能；当接收耗能电流$I_{dump}>0$时，则采用PID闭环控制（图10），动态调节占空比以精确跟踪该电流指令。PID算法的数学表达如下：

$$D(t)=K_p e(t)+K_i\int_0^t e(\tau)\mathrm{d}\tau+K_d\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式中：$D(t)$为控制占空比；$e(t)$为误差信号，$e(t)=I_{dump}-I_{H1}$；I_{H1}为反馈电流；K_p、K_i、K_d为PID系数。

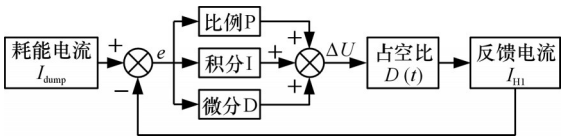


图10　耗能电流PID控制框图

Fig.10　Energy dissipation current PID control diagram

调控过程中，若$I_{H1}\geqslant I_{dump}$，则持续调控；若$I_{H1}<I_{dump}$，则检查占空比$D(t)$。若$D(t)<100\%$，继续精调；若$D(t)=100\%$，说明耗能系统已满负荷运行，则向整机控制器反馈“耗能超限”告警，后续处理流程按3.1.1节中张力模式执行。

3.2.2　耗能冷却控制

为保障耗能电阻散热与运行安全，系统根据2.2.5节设计要求实施冷却控制，控制流程见图9。耗能系统启动后即刻开启风扇电机M1进行强制对流散热，同时采集入口温度T_1、出口温度T_2及环境温度T_{amb}，根据监测结果执行以下控制。

1）常规冷却调控：若$T_2>T_1$，表明电阻仍处于发热状态，保持风扇电机M1运行；若$T_2\leqslant T_1$，表明电阻已冷却充分，关闭M1以节省能耗。

2）超温故障保护：若$T_1>T_{amb}$（热蔓延至入口侧，判定为散热故障）或$T_2\geqslant T_{max}$（预设超温值，判定为电阻超温），系统立即触发“耗能超限”预警，按2.2.5节的温度保护策略执行，即启动负载协同耗能机制（2.2.4节）或降低张力电机发电功率，从源头削减电阻发热量。

4　试验

为验证本文提出的能量回收系统及控制策略的正确性，对搭载该系统的中联牌SA-ZD-2×50电动张力机进行测试，重点评估其能量回收性能、动态响应、稳态精度及系统稳定性。

4.1　试验准备

试验使用的主要设备与仪器如表1所示。

表1　试验主要设备与仪器

Tab.1　Major equipment and instruments used in the test

名称	型号	数量	用途
电动张力机	SA-ZD-2×50	1套	作为验证机
液压张力机	SA-ZY-2×80	1套	作为加载机
拉力计	AXT-B-15T	1台	校准张力
计时器	LNMB0-121	1套	校准速度
钳形表	UT216C	1套	复核电流
测温仪	UT301C	1套	复核温度

1）场地布置。试验模拟真实架线施工，在室外开阔场地进行。验证机（SA－ZD－2×50）置于张力场，加载机（SA－ZY－2×80）置于牵引场，两机相距150 m。按DL/T 5343—2018的施工工艺要求正确连接验证机张力轮与加载机牵引轮，如图11所示。



图11　试验场地布置

Fig.11　Test site layout

2）模式设置。验证机设为张力模式，使其处于张力放线预发电状态；加载机设为牵引模式，模拟牵引机对验证机加载。

3）参数校准与复核。依据DL/T 1109—2019分别校准放线速度与额定张力；继而使用钳形表与测温仪对关键运行参数（系统电流、耗能电

阻温度)进行复核,以确保测量数据的准确性。

4.2 功能与性能试验

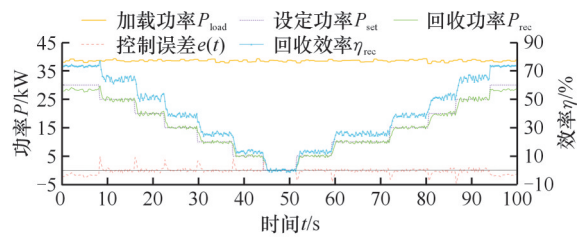
4.2.1 功能与性能试验方法

电动张力机实际作业时,加载功率随工况波动而回收设定功率通常固定。为便于验证系统核心功能,本试验采用反向模拟方法,即保持加载功率恒定,通过阶跃调整回收设定功率来主动制造波动。

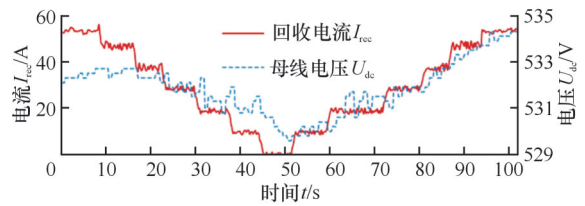
在电池SOC为20%~85%的典型工作区间内展开试验。具体步骤如下:调整加载机使验证机加载功率$P_{load}\geqslant 35$ kW($P_{load}=Fv$,据DL/T 1109—2019,F为额定张力50 kN,v为额定速度2.5 km/h);将回收设定功率从30 kW以5 kW为步长递减至0,再递增回30 kW,同步采集数据。

4.2.2 功能与性能试验分析

试验数据如图12所示。测试期间,实际加载功率在37.6~39.2 kW之间,满足试验要求。数据显示回收功率紧随设定功率阶跃变化,并表现出良好的动态响应与稳态性能。



(a)功率与效率



(b)电流与电压

图12 功能与性能试验数据

Fig.12 Functional and performance test data

1)回收功率可调。试验表明,回收电流随着设定功率变化,母线电压也呈相应趋势,符合系统原理。回收功率P_{rec}($P_{rec}=U_{dc}I_{rec}$)能准确跟踪设定功率的阶跃变化,在0~30 kW范围内系统均可快速稳定,且稳态偏差极小。证明系统具备宽范围、高精度的回收功率调节能力。

2)回收功率高。回收效率按$\eta_{rec}=P_{rec}/P_{load}$计算。设定功率在30 kW时由于耗能系统未介入,整机系统展现出72.6%~74.4%的真实回收效率。得益于张力发电单元与电池在直流母线上的直接并联架构,能量回收路径简洁,除辅助系统基础能耗外无额外损耗,表明本系统在提高能效与减少浪费方面优势显著。

3)控制响应快。系统对阶跃指令的响应时间为0.75~1.25 s,且91%的响应在1 s以内,满足了电动张力机的工况动态响应需求。表明控制器与执行机构配合紧密,能够在发电波动时迅速建立新的能量平衡。

4)稳态精度优。系统表现出高稳态精度,其稳态误差$e(t)=P_{set}-P_{rec}$,小于1 kW(对应电流小于1.9 A)。在设定功率为30 kW时,受辅助系统耗能影响,误差可忽略。系统调整初期有尖峰但能迅速稳定,且误差随设定功率降低、占空比$D(t)$升高而减小。这源于基于电池状态与系统能量流的实时闭环策略,该策略与PID反馈控制协同作用,有效抑制了内外扰动,从而保障了系统的长期稳定运行。

4.3 持续耗能试验

4.3.1 持续耗能试验方法

本试验专项验证系统在电池饱和、回收受限时持续耗能,确保安全运行的能力。具体如下:将动力电池SOC调至90%以上,模拟电池临近饱和状态;启动加载机使$P_{load}\geqslant 35$ kW;设定验证机回收功率$P_{set}=0$;持续运行时长不短于720 s(对应张力工况),之后待机至耗能电阻冷却充分,记录数据。

4.3.2 持续耗能试验分析

依上述方法进行试验,试验环境温度为33 ℃,电池SOC为92%,关键试验数据见表2。

表2 持续耗能试验数据

Tab.2 Results of the continuous energy consumption test

试验时间/min	加载功率/kW	母线电压/V	回收电流/A	温度T_1/℃	温度T_2/℃	耗能状态
0	0	533	−0.4	33	33	待机
5	35.6	531	−0.6	39	87	耗能
10	35.3	532	−1.0	42	95	耗能
15	35.7	531	−0.5	43	96	耗能
20	35.8	530	−1.5	45	94	耗能
25	0	531	−1.0	39	49	待机
28	0	533	−0.6	33	33	待机

1)电压稳定性良好。试验期间,母线电压稳定在530~533 V范围,波动小于2 V,无电压攀升、过压故障。表明系统能迅速全额消耗富余能量,有效维持电压稳定。

2)电池保护有效。设定回收功率$P_{set}=0$,禁止能量回收后,电池处于放电状态,放电电流为0.5~1.5 A。系统未向电池注入任何回收电流,完全避免了电池过充,验证了该系统在回收受限时的保护能力。

3)冷却管理有效。在持续大功率工况下，耗能电阻于10 min内达到热平衡，出口温度T_2最高为96 ℃，与环境的温差为63 ℃，表明散热性能良好。该温度远低于电阻单元内部高温线束的120 ℃耐温限值(线束为电阻单元内最低耐温部件)，安全裕度充足。

此外，在“更换绳盘”的600 s待机窗口期内，系统在8 min(480 s)内冷却，无热累积，证明其具备长期、稳定、安全的持续耗能能力。

5　结论

针对传统柴油液压张力机张力工况能量浪费严重，且现有能量回收方案难以适配电动张力机高占比、长周期回收工况的痛点，本文提出基于电阻耗能的能量回收系统，构建“发电-回收-调节”能量闭环，实现机械能可控回收与富余能量动态耗散，解决了系统回收受限时的能量平衡难题。

研究表明，该系统通过实时采集电池、能量流及耗能系统状态，采用自适应耗能电流调控策略，可灵活适配不同能量回馈强度，有效抑制母线电压波动，避免电池过充、电气元件过压等风险。试验验证表明，系统额定加载功率下回收效率达72.6%以上，响应时间0.75～1.25 s，稳态误差小于1 kW；系统回收受限时持续耗能720 s，母线电压稳定、电阻温升可控，安全性与可靠性良好。

本文突破现有方案局限，有效保障电池安全与系统稳定运行，提高施工能效。该系统因无冗余能量转换而能流路径简洁，且控制简便、工程化落地性强，尤其适用于长时连续、高占比能量回收工况，为工程装备绿色升级提供可推广技术路径，契合“双碳”战略。

本文局限于单机运行场景，未考虑多机协同，极端环境下的适应性有待进一步验证。未来将探索多机能量共享，优化特殊环境下系统性能，并构建碳能协同管控系统，为输电线路施工装备集群的绿色低碳化运行提供更全面的解决方案。

参考文献：

[1] 高优梁，刘建锋，黄超胜，等. 智能牵张机研究现状与发展趋势[J]. 现代制造技术与装备，2021，57(1)：207-210.
GAO Youliang，LIU Jianfeng，HUANG Chaosheng，et al. Research Staus and Development Trend of Intelligent Stretcher [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment，2021，57(1)：207-210.

[2] 新疆送变电有限公司. 一种能量回收式纯电动张力机及其控制方法：202310541234.6[P]. 2025-08-08.
Xinjiang Power Transmission and Transformation Co.，Ltd. An Energy Recovery Type Pure Electric Tensioner and Its Control Method：202310541234.6 [P]. 2025-08-08.

[3] 蒋晓峰. 一种新能源张力机及其工作方法：CN201811651697.3[P]. 2025-01-17.
JIANG Xiaofeng. A New Energy Tensioner and Its Working Method：CN201811651697.3[P]. 2025-01-17.

[4] 甘肃送变电工程有限公司，甘肃诚信电力科技有限责任公司. 一种电动张力机及其控制系统：CN202311044160.1[P]. 2023-11-21.
Gansu Power Transmission and Transformation Engineering Co.，Ltd.，Gansu Chengxin Electric Power Technology Co.，Ltd. An Electric Tensioner and Its Control System：CN202311044160.1[P]. 2023-11-21.

[5] 甘肃诚信电力科技有限责任公司. 一种输电线路电动张力场能量单元：CN202422560484.7[P]. 2026-01-30.
Gansu Chengxin Electric Power Technology Co.，Ltd. A Transmission Line Electric Tension Field Energy Unit：CN202422560484.7[P]. 2026-01-30.

[6] 袁东，廖自力，李年裕，等. 车载综合电力系统动态重构及其功率流控制[J]. 火力与指挥控制，2019，44(8)：82-88.
YUAN Dong，LIAO Zili，LI Nianyu，et al. Dynamic Reconfiguration and Its Power Flow Control of Vehicular Integrated Power System[J]. Fire Control & Command Control，2019，44(8)：82-88.

[7] 王喆云，郑燕萍，陆强. 一种复合电源纯电动公交车再生制动控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2024，38(5)：71-77.
WANG Zheyun，ZHENG Yanping，LU Qiang. A Regenerative Braking Control Strategy for Pure Electric Bus with Compound Power Supply[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)，2024，38(5)：71-77.

[8] 宋百玲，胡思远. 双能量源纯电动汽车制动能量回收控制策略研究[J]. 自动化与仪表，2024，39(6)：10-15.
SONG Bailing，HU Siyuan. Research on Control Strategy for Braking Energy Recovery of Dual Energy Source Pure Electric Vehicles [J]. Automation & Instrumentation，2024，39(6)：10-15.

[9] 湖南中联重科应急装备有限公司. 能量回收张力机及能量回收控制方法：CN202411202317.3[P]. 2024-12-03.
Hunan Zoomlion Emergency Equipment Co.，Ltd. Energy Recovery Tensioner and Energy Recovery Control Method：CN202411202317.3[P]. 2024-12-03.

[10] 龚正良，温芳梅，汤士军，等. 锂离子电池日历老化机制的研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版)，2025，64(1)：31-44.
GONG Zhengliang，WEN Fangmei，TANG Shijun，et al. Research Progress on Calendar Aging Mechanism of Lithium-ion Batteries[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science)，2025，64(1)：31-44.

(编辑　袁兴玲)

作者简介：周　磊*(通信作者)，男，1990年生，工程师。研究方向为应急装备及输电线路施工装备(如牵引机、张力机)的电动化、绿色化升级。E-mail：zhoulei.90@foxmail.com。

本文引用格式：

周磊，王建永，房喆，等. 张力架线电动张力机能量回收系统及其控制策略[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2520-2527.

ZHOU Lei，WANG Jianyong，FANG Zhe，et al. Energy Recovery System and Its Control Strategy for Electric Tensioner in Tension Stringing[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(10)：2520-2527.